

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

RECD 30 JAN 2004	
WIPO	PCT



PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)

Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

Aktenzeichen: 102 60 535.1

Anmeldetag: 21. Dezember 2002

Anmelder/Inhaber: MTU Aero Engines GmbH, 80995 München/DE

Bezeichnung: Verfahren zur Herstellung von aus Halbrohren oder
Rohren bestehenden Wärmetauscherrohren für
Rekuperativ - Abgaswärmetauscher

IPC: B 22 D, B 22 C, F 28 D

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 7. Januar 2004
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

Hof

Verfahren zur Herstellung von aus Halbrohren oder Rohren bestehenden Wärmetauscherrohren für Rekuperativ-Abgaswärmetauscher

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung von Halbrohren oder Rohren mit einer Vielzahl von deren Mantelfläche durchdringenden Öffnungen aus einem metallischen, hochwarmfesten Werkstoff zur Bereitstellung von Wärmetauscherrohren für Rekuperativ-Abgaswärmetauscher sowie Halbrohre/Rohre nach diesem Verfahren.

Die in Gasturbinentriebwerken eingesetzten Rekuperativ-Abgaswärmetauscher umfassen bekanntlich neben einem Wärmetauschergehäuse im Wesentlichen ein Verteilerrohr zur Zuführung der von einem Verdichter geförderten "kalten" Luft in eine vom heißen Turbinenabgas umströmte so genannte Kreuz-Gegenstrom-Matrix und ein Sammelrohr zur Abführung der nun aufgeheizten "heißen" Verdichterluft zu einem geeigneten Verbraucher, z. B. der Brennkammer des Gasturbinentriebwerks. Nachfolgend werden das Verteiler- als auch das Sammelrohr vereinfachend auch als Wärmetauscherrohr bezeichnet.

Die Zuführung der Luft vom Verteilerrohr in die Kreuz-Gegenstrom-Matrix bzw. die Abführung der Luft von der Kreuz-Gegenstrom-Matrix in das Sammelrohr erfolgt über eine Vielzahl von in die Mantelfläche der Wärmetauscherrohre eingebrachten Öffnungen.

Die Kreuz-Gegenstrom-Matrix umfasst ihrerseits eine Vielzahl von zu einem Rohrbündel zusammengefassten ellipsenförmigen Lanzetten oder Röhrchen. Das Rohrbündel ist an den parallel angeordneten Wärmetauscherrohren seitlich, u-förmig auskragend angeordnet, wobei die Enden eines jeden Röhrchens des Rohrbündels jeweils mit einem in die Mantelfläche der Wärmetauscherrohre eingebrachten Öffnung korrespondieren. Um den gewünschten Durchsatz erzielen zu können, sind eine Vielzahl von Lanzetten und somit eine Vielzahl von Öffnungen/Löcher in der Mantelfläche der Wärmetauscherrohre erforderlich.

Die aus einem hochwarmfesten Werkstoff bestehenden Wärmetauscherrohre sind bisher aus geschmiedeten Halbrohren zusammengesetzt. Das Zusammenfügen zwei-

er Halbrohre zu einem Wärmetauscherrohr erfolgt durch Schweißen, das Anbringen der Lanzetten an die Wärmetauscherrohre erfolgt mittels Hochtemperaturlöten.

5 Nach einer typischen Ausführungsform eines die Maße 500mm Länge, 62,5mm Halbdurchmesser aufweisenden Halbrohrs sind an 19 Umfangspositionen Lochreihen mit jeweils 184 Öffnungen vorgesehen, so dass sich pro Halbrohr insgesamt 3.496 Öffnungen in der Mantelfläche ergeben. Für die Herstellung der Wärmetauscherrohre eines Rekuperativ-Abgaswärmetauschers aus Halbrohren sind somit $4 \times 3.496 = 13.984$ Löcher/Öffnungen in der Mantelfläche der Halbrohre erforderlich.

10 Das Einbringen einer solchen Vielzahl von Öffnungen in die Mantelfläche der geschmiedeten Halbrohre erweist sich als äußerst kosten- und zeitintensiv.

15 So erfolgt bisher das Einbringen der Öffnungen in die Mantelfläche der Halbrohre mittels Funkenerosion (EDM = Electro-Discharge-Machining). EDM ist ein bekanntes Verfahren zum Erzeugen von Löchern oder anderen Öffnungen in Metallen. Das Verfahrensprinzip, nämlich das thermische Abtragen kleiner Volumina durch die hohe Leistungsdichte eines lokal im flüssigen Dielektrikum durchbrechenden Lichtbogens auf der Anode (Werkstück), bedingt ein Aufschmelzen des Werkstoffs in mikroskopischen Dimensionen.

20 Neben den hohen Kosten hat das EDM-Verfahren einen weiteren Nachteil. Aufgrund der verfahrensbedingten Vorgehensweise beim Einbringen der Öffnungen in die Mantelfläche der Wärmetauscherrohre ergeben sich im Bereich der Lochwände auf den Werkstücken wiedererstarre Schichten, die sogenannte Recast-Layer. Diese sind vor dem nachfolgend durchzuführenden Hochtemperaturlöten für das Einlöten der Lanzetten in die Halbrohre zu beseitigen, was sich als nachteilig und schwierig erweist. Die für das Hochtemperaturlöten geforderten engen Lötspalte und geringen Toleranzen ($\pm 0,05\text{mm}$) sind bei vorhandener Recast-Layer aus Wirtschaftlichkeitsgründen
30 (langsame feine Bearbeitungsstufe erforderlich) häufig nicht zu erreichen.

Elektrochemisches Bearbeiten (ECM = electrochemical machining) ist eine andere Option zum Erzeugen der Öffnungen in der Mantelfläche der Halbrohre. Dieses Ver-

fahren erfordert jedoch hohe Kosten für Aufbau und Werkzeug und hat kapitalintensive Ausrüstungskosten. Außerdem ist das Elektrolyt bei diesem Verfahren typischerweise ein Oxidationsmittel, beispielsweise Natriumnitrat oder Natriumchlorat, ein Gesundheits- und Sicherheitsrisiko, und die Nebenprodukte des Verfahrens sind
5 als gefährlicher Abfall klassifiziert.

Zusammenfassend bedeutet dies, dass das Einbringen der Öffnungen in die Mantelfläche der geschmiedeten Halbrohre technologisch, terminlich und kostenmäßig einen risikoreichen Pfad in der Herstellung des gesamten Rekuperativ-Abgaswärmetauschers darstellt.
10

Aufgabe der Erfindung ist es, hier Abhilfe durch ein Verfahren zur Herstellung von solchen Halbrohren oder Rohren mit einer Vielzahl von deren Mantelfläche durchdringenden Öffnungen aus einem metallischen, hochwarmfesten Werkstoff zu schaffen, das ohne die Nachteile der bisher angewendeten Verfahren ist.
15

Diese Aufgabe ist erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass die Halbrohre oder Rohre unter Anwendung eines Feingussverfahrens als hochpräzise Feingussteile hergestellt werden.

20

Ein solches Feingussverfahren hat den Vorteil, dass es hohe Reproduzierbarkeit mit gleichbleibend hoher Qualität mit geringen Herstellungskosten vereinbart.

Um Reaktionen der Schmelze mit umgebenden Gasen wie Sauerstoff, Stickstoff oder Wasserstoff zu vermeiden erfolgt zumindest das Abgießen der Schmelze in die Formschale ohne reaktive Gase, insbesondere unter Vakuum, Inertgas-Atmosphäre oder ähnliches.
25

Damit auch enge Querschnitte und feine Konturen sauber "auslaufen" erfolgt das Abgießen der Schmelze in heiße Formschalen unter Anwendung von Vakuum oder Inertgas-Überdruck.
30

Vorzugsweise wird als hochwarmfester Werkstoff für das Feinvergussverfahren eine Nickel-Basis-Legierung, insbesondere IN 625, verwendet.

5 Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der nach dem Verfahren hergestellten Halbrohre oder Rohre sind die die Mantelfläche durchdringenden Öffnungen ellipsenförmig ausgebildet. Der Halbdurchmesser der Halbrohre/Rohre ist 62,5 oder 37,5 mm, die Länge der Halbrohre beträgt 500 mm oder 750-900 mm.

10 Die erfindungsgemäße Anwendung eines an sich bekannten Feingussverfahren zur Herstellung von Wärmetauscherrohren aus Halbrohren oder Rohren ermöglicht erstmals eine kostengünstige, schnelle und qualitativ hochwertige Herstellung solcher Rohrkomponenten.

15 Die Erfindung ist nachfolgend anhand eines in der Zeichnung mehr oder minder schematisch dargestellten Ausführungsbeispiels beschrieben.

Es zeigen:

- 20 Fig. 1 den prinzipiellen Aufbau eines Rekuperativ-Abgaswärmetauschers,
Fig. 2 eine detaillierte Ansicht eines Wärmetauscherrohrs und
Fig. 3 den Aufbau des Wärmetauscherrohrs gemäß Fig. 2 aus Halbrohren.

25 Ein in Fig. 1 insgesamt mit der Bezugsziffer 10 bezeichneter Rekuperativ-Abgaswärmetauscher eines hier nicht dargestellten Gasturbinentriebwerks umfasst im wesentlichen ein Verteilerrohr 12, ein parallel dazu angeordnetes Sammelrohr 14 sowie eine hierzu seitlich, U-förmig auskragende Kreuz-Gegenstrom-Matrix 16. Verteilerrohr 12 und Sammelrohr 14 werden im weiteren Verlauf vereinfacht als Wärme-
30 tauscherohre bezeichnet.

Aus der in Fig. 1 unten links angeordneten Schnittdarstellung der Kreuz-Gegenstrom-Matrix 16 ist zu entnehmen, dass die Kreuz-Gegenstrom-Matrix 16 eine Vielzahl von

ellipsenförmigen Röhrchen bzw. Lanzetten 18 aufweist. Die Lanzetten 18 sind jeweils am Verteiler- und Sammelrohr 12, 14 befestigt. Sie korrespondieren mit den hierfür in die Mantelfläche von Verteiler- und Sammelrohr 12, 14 eingebrachten, in dieser Darstellung nicht sichtbaren, Öffnungen/Löcher 22, vgl. Fig. 2.

5

Die Wirkungsweise des vorstehend beschriebenen Rekuperativ-Abgaswärmetauscher ist die folgende:

10 Dem Verteilerrohr 12 wird von einem Verdichter gemäß dem Pfeil D kalte Druckluft zugeführt. Die kalte Druckluft strömt vom Sammelrohr 12 über die in die Mantelfläche eingebrachten Öffnungen/Locher in die seitlich, u-förmig auskragende Kreuz-Gegenstrom-Matrix 16. Durch die Umströmung der Kreuz-Gegenstrom-Matrix 16 mit dem heißen Turbinenabgas H erfolgt eine Aufheizung der kalten Verdichterluft. Nach
15 Durchströmung der Kreuz-Gegenstrom-Matrix 16 und Zuführung in das Sammelrohr 14 wird die nun aufgeheizte Luft gemäß dem Pfeil D' einem geeigneten Verbraucher, z. B. der Brennkammer zugeführt.

Fig. 2 zeigt in vergrößerter Darstellung eine Detailansicht eines belochten Wärmetauscherrohrs 12/14 des Rekuperativ-Abgaswärmetauschers 10. Das Wärmetauscherrohr 12/14 weist eine Vielzahl von dessen Mantelfläche 20 durchdringende
20 Öffnungen 22 auf. Die Öffnungen 22 sind ellipsenförmig ausgebildet. Von dieser Vielzahl von Öffnungen 22 in der Mantelfläche 20 sind aus Gründen der Übersichtlichkeit hier nur einige der die Mantelfläche 20 des Wärmetauscherrohrs 12/14 durchdringende Öffnungen 22 dargestellt. Der Vollständigkeit halber sei darauf hin-
25 gewiesen, dass pro Halbrohr mit den Abmaßen 500 mm Länge, 62,5 mm Halbdurchmesser an 19 Umfangspositionen 184 Löchreihen, also 3.496 Öffnungen 22, vorgesehen sind. Somit ergeben sich pro Wärmetauscherrohr 12/14 insgesamt $2 \times 3.496 = 6.992$ die Mantelfläche 20 durchdringende Öffnungen 22.

30 Das Wärmetauscherrohr 12/14 ist, wie Fig. 3 zeigt, in diesem Beispiel aus einem ersten Halbrohr 24 und einem zweiten Halbrohr 26 zusammengesetzt. Das Zusammenfügen der beiden Halbrohre 24, 26 erfolgt durch Schmelzschweißen, das Anbringen der Lanzetten erfolgt in bekannter Weise mittels Hochtemperaturlöten.

Die Herstellung der Halbrohre 24, 26 mittels eines an sich bekannten Feingussverfahrens wird nunmehr im einzelnen beschrieben, wobei die Verfahrensschritte – mit Ausnahme des Zusammensetzens der Halbrohre – in gleicher Weise auch für die
5 Herstellung eines Rohres, d.h. eines Vollrohres, gelten.

In einem ersten Verfahrensschritt wird hierzu zunächst ein durch Hitze zerstörbares feinstrukturiertes, maßgenaues Modell der Halbrohre 24, 26 einschließlich der die Mantelfläche 20 durchdringenden Öffnungen 22 hergestellt. Als Modellwerkstoff
10 wird hierzu Wachs verwendet.

Das Wachsmodell inklusive Angusssystem aus Wachs erhält durch Eintauchen in keramische Überzugsmassen und durch anschließendes Besanden mit Gusschalenkeramik eine Formschale. Um die Stabilität der Formschale zu gewährleisten wird
15 der automatisierte Prozess des Eintauchens und anschließenden Besandens mehrmals wiederholt.

Nach dem Ausschmelzen des Modells, vorzugsweise im Autoklaven mit Heißdampf, werden die so entstandenen, einteiligen Formschalen gebrannt, wodurch diese ihre
20 Feuerfestigkeit erhalten. Anschließend erfolgt das Gießen der Schmelze in heiße Formschalen unter Anwendung von Vakuum oder Überdruck mit Inertgas.

Damit wird sichergestellt, dass auch die engen Querschnitte zwischen zwei Öffnungen 22 in der Mantelfläche 20 eines Halbrohrs 24, 26 sauber "auslaufen". Das Er-
25 schmelzen und Gießen des Halbrohrwerkstoffes erfolgt unter Hochvakuum. Als Werkstoff wird eine Nickel-Basislegierung mit der Normbezeichnung IN 625 (INCO-NEL) verwendet.

Die gegossenen Halbrohre 24, 26 sind anschließend zu putzen, wobei auch die Angüsse zu entfernen sind. Für die Fertigstellung der Halbrohre 24, 26 ist ggf. in einem letzten Arbeitsschritt noch eine Nachbearbeitung der die Mantelfläche 20 durchdringenden Öffnungen 22 durch Strahlen mit erosiven Strahlmitteln oder durch eine
30 „Schlichtoperation“ mittels EDM (EDM=Electro-Discharge-Machining) notwendig.

Aufgrund der hohen Güte und knappen Toleranzen des angewendeten Feingussverfahrens ist hierfür nur eine geringe Bearbeitungszeit notwendig. Die bisher beim Erzeugen der Öffnungen durch EDM entstehenden Recast-Layer können stark minimiert werden und daher unberücksichtigt bleiben, da diese infolge der geringen Bearbeitungsdauer vernachlässigbar dünn/klein sind.

Das Zusammensetzen zweier solcher Halbrohre 24, 26 zu einem Wärmetauscherrohr 12/14 erfolgt über ein ebenfalls bekanntes Schmelzschweißverfahren. Die Einbringung der Lanzetten aus IN 625 in die ellipsenförmigen Durchbrüche erfolgt nach möglichst automatischer Montage und Belotung mit Lotpaste durch Vakuum-Hochtemperaturlöten.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung von Halbrohren (24, 26) oder Rohren mit einer Vielzahl von deren Mantelfläche (20) durchdringenden Öffnungen (22) aus einem metallischen, hochwarmfesten Werkstoff zur Bereitstellung von Wärmetauscherrohren für Rekuperativ-Abgaswärmetauscher unter Verwendung eines Feingussverfahrens
2. Verfahren nach Anspruch 1 mit folgenden Verfahrensschritte:
 - Erzeugen je eines/eines durch Hitze zerstörbaren Modells der Halbrohre (24, 26) / des Rohres
 - Erzeugen von Formschalen/einer Formschale durch Komplettieren mit einem üblichen Angussystem und Eintauchen der Modelle/des Modells in keramische Überzugsmassen und Besanden mit Gusschalenkeramik (in mehreren Zyklen abwechselnd)
 - Ausschmelzen der Modelle/des Modells aus den Formschalen/der Formschale, z.B. im Autoklaven
 - Aushärten der Formschalen/der Formschale durch Brennen
 - Herstellung einer Schmelze aus dem metallischen, hochwarmfesten Werkstoff
 - Abgießen der Schmelze in die Formschalen/die Formschale unter Verwendung von Vakuum oder Inertgas-Überdruck
 - Nach Erstarren der Schmelze Ausformen der Halbrohre/des Rohres durch Zerstörung der Formschalen/der Formschale

- Putzen der Halbrohre (24, 26)/des Rohres und Entfernen der Angüsse/des Angusses
 - Bei Bedarf Nachbehandlung der die Mantelfläche (20) der Halbrohre (24, 26)/des Rohres durchdringenden Öffnungen (22) durch Funken-erosion (EDM=Electro-Discharge-Machining) oder Strahlen mit abrasiven Strahlmitteln
 - Im Falle der Halbrohre: Zusammenfügen zweier Halbrohre (24, 26) mittels Hochtemperatlöten oder Schmelzschweißen zu einem Wärmetauscherrohr (12, 14).
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Modellwerkstoff Wachs verwendet wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest das Abgießen der Schmelze in die Formschale ohne reaktive Gase, insbesondere unter Vakuum, Inertgas-Atmosphäre oder ähnliches, erfolgt.
5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Schmelze in heiße Formschalen gegossen wird.
6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass als hochwarmfester Werkstoff für das Feinvergussverfahren eine Nickel-Basis-Legierung, insbesondere IN 625, verwendet wird.
7. Nach dem Verfahren gemäß der Ansprüche 1 bis 5 hergestellte Halbrohre (24, 26)/Rohre **dadurch gekennzeichnet**, dass die die Mantelfläche (20) der Halbrohre (24, 26)/Rohre durchdringenden Öffnungen (22) ellipsenförmig ausgebildet sind.

8. Halbrohre/Rohre nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Länge der Halbrohre (24, 26)/Rohre 500mm bei einem Halbdurchmesser von 62,50 mm beträgt, oder dass die Länge der Halbrohre (24,26)/Rohre 750-900 mm bei einem Halbdurchmesser von 37,50 mm beträgt.

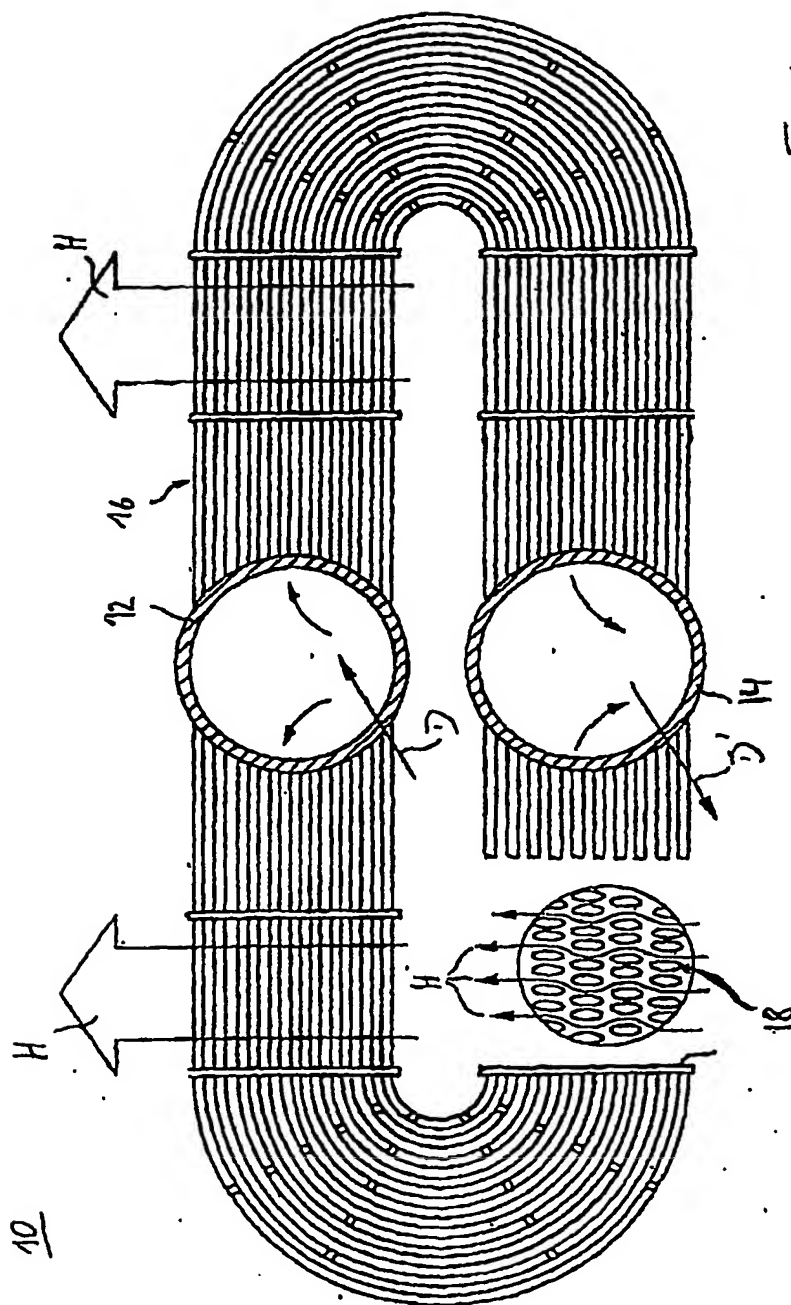


Fig. 1

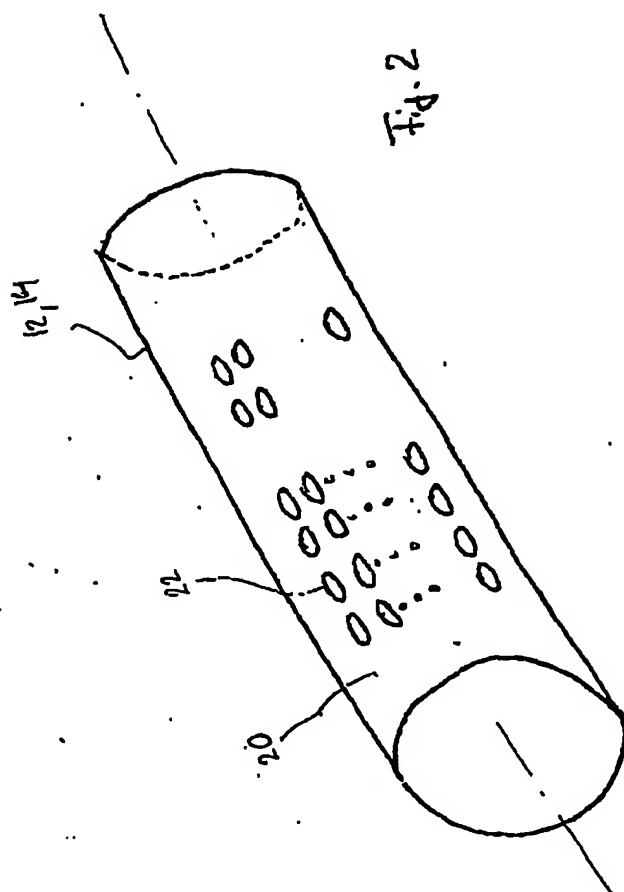


Fig. 2

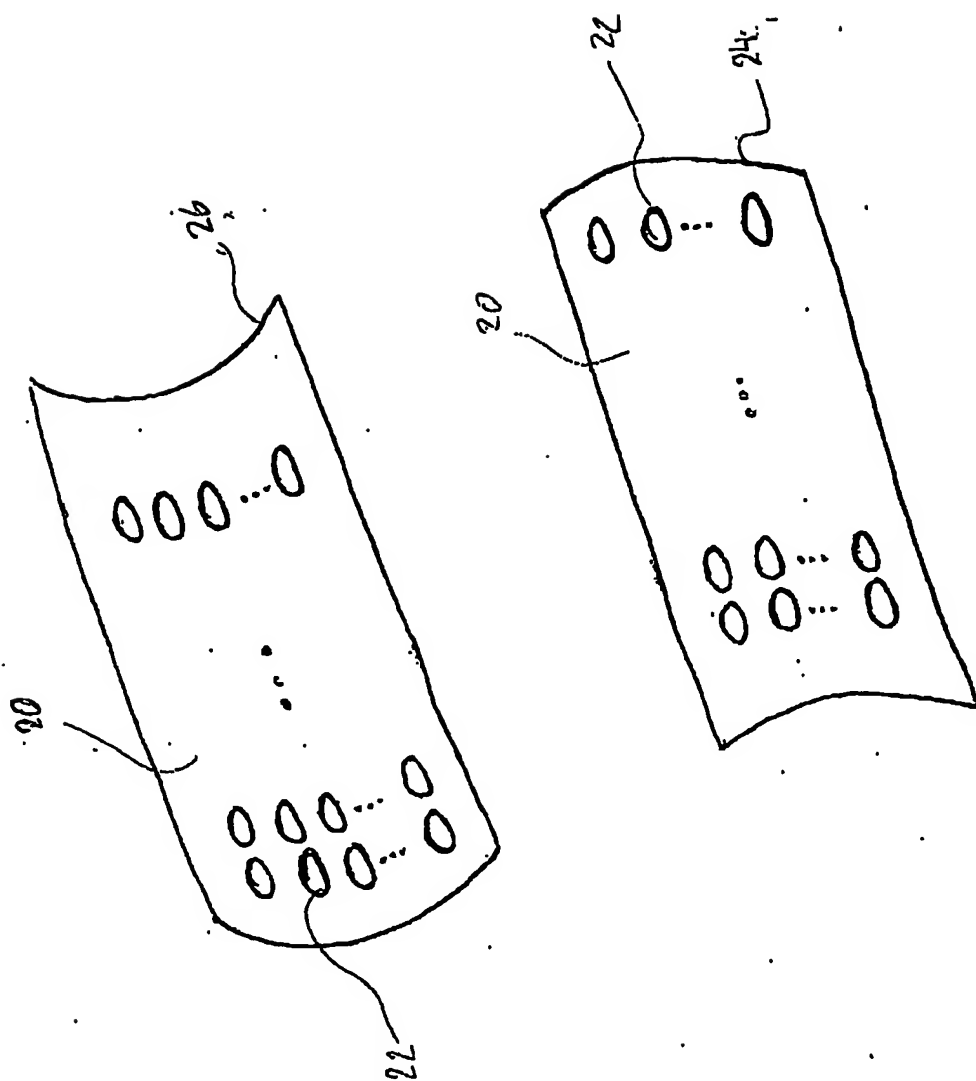


Fig. 3

Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung von Halbrohren (24, 26) oder/
5 Rohren eines Rekuperativ-Abgaswärmetauschers (10) unter Verwendung des Fein-
gussverfahrens, wobei die aus einem hochwarmfesten metallischen Werkstoff beste-
henden Halbrohre (24, 26)/Rohre eine Vielzahl von ihre Mantelfläche (20) durch-
dringende ellipsenförmige Öffnungen (22) aufweisen.

Fig. 3

10

15

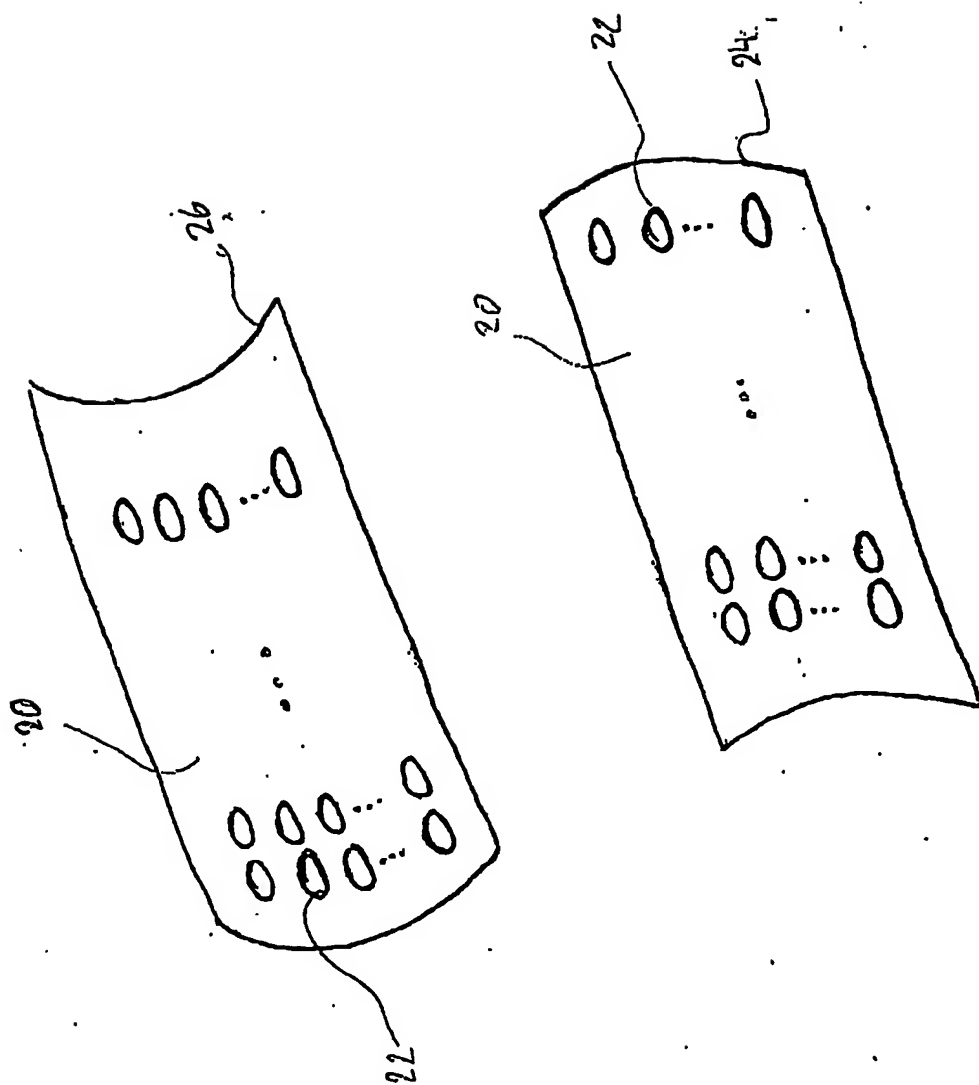


Fig. 3

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

☐ **BLACK BORDERS**

☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**

☒ **FADED TEXT OR DRAWING**

☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**

☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**

☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**

☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**

☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**

☒ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**

☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.